

## 척수손상 환자에서의 심박변동 분석에 의한 자율신경기능 평가

연세대학교 의과대학 재활의학교실 및 재활의학연구소  
<sup>1</sup>중문외대 분당 차병원 재활의학과

박창일 · 전중선<sup>1</sup> · 신지철 · 김덕용 · 조성래

= Abstract =

### Assessment of Autonomic Nervous Function with Power Spectral Analysis of Heart Rate Variability in Spinal Cord Injured Patients

Chang Il Park, M.D., Joong Son Chon, M.D.<sup>1</sup>, Ji Cheol Shin, M.D.  
Deog Yong Kim, M.D. and Sung Rae Cho, M.D.

Department of Rehabilitation Medicine, Yonsei University College of Medicine  
Institute of Rehabilitation Medicine, Yonsei University College of Medicine  
<sup>1</sup>Department of Rehabilitation Medicine, Joong Moon College of Medicine

**Objective:** To investigate the autonomic activities in spinal cord injured patients, and to compare their activities according to the level and completeness of spinal cord lesions.

**Method:** Thirty-five spinal cord injured patients and thirty healthy adults participated in this study. The ECG signals were recorded at the tilt angle of 0° and 70° for 5 minutes, and power spectral analysis of Heart Rate Variability (HRV) was done at each angle.

**Results:** The data reveals two major components such as a low-frequency (LF) component (0.05~0.15 Hz) reflecting primarily sympathetic activities with orthostatic stress, and a high-frequency (HF) component (0.2~0.3 Hz) reflecting parasympathetic activity. In supine position, all frequency components were not significantly different regardless the level and completeness of spinal cord lesion. At 70° head-up tilt position, the LF power and heart rate didn't increase in complete tetraplegia but significantly increased in paraplegia and healthy adults ( $p < 0.05$ ). However, the HF power didn't reveal any differences in four groups by decreasing significantly in all groups.

**Conclusion:** We concluded that there is an abnormal control of autonomic activities especially the sympathetic function in complete tetraiplegia, compared with paraplegia and healthy adults.

---

**Key Words:** Autonomic nervous function, Heart rate variability, Spinal cord injury

## 서 론

자율신경계는 외부환경에 대한 체내의 항상성을 유지하는 중요한 기능을 담당하고 있다. 최근 심장 혈관계 및 자율신경계 질환들과 자율신경 기능과의 연관성에 대한 관심이 높아졌고, 자율신경계 활동도를 정확히 객관적으로 평가할 수 있는 방법의 필요성이 대두되고 있다.<sup>1,18)</sup> 심장박동은 체내의 항상성 유지를 위하여 변화하며, 교감 및 부교감신경의 활동도에 따라 조절되므로, 심박수 및 심장주기(R-R interval)에 대한 연구를 통하여 자율신경계의 측정이 가능하다.<sup>2,4)</sup> 심박변동(heart rate variability)은 이러한 심박수의 변화만을 의미하는 것이 아니라, 심장주기의 시간적 변동을 측정하고 정량화한 것으로,<sup>6)</sup> 자율신경계의 조절작용에 의한 심박변동을 분석함으로써 교감신경과 부교감신경간의 균형상태 및 각각의 활동도를 평가할 수 있다.<sup>14,15)</sup> 심박변동의 주파수 영역(frequency-domain) 분석방법은 신뢰성과 재현성이 높고, 객관적이며 비침습적인 자율신경계 기능평가 방법으로 최근 활발한 연구가 시도되고 있다.<sup>1,2)</sup>

척수손상 환자의 심박변동 분석에 대한 보고를 살펴보면, 1990년 Inoue등<sup>9)</sup>은 양와위 자세에서의 심박변동 분석상, 경수손상에 의한 완전 사지마비 환자에서 주로 교감신경 성분을 나타내는 저주파전력은 보이지 않았고, 부교감신경 성분을 나타내는 고주파전력만 측정되었다고 하였으며, 이는 척수위 심혈관계 중추와 말초 교감신경과의 통로가 완전히 절단되었기 때문이라고 하였다. 이후 1995년 Inoue등<sup>10)</sup>은 계속된 연구에서 일부 완전 사지마비 환자에서 저주파전력 성분이 관찰되었다고 하였고, Grimm등<sup>8)</sup>도 완전 사지마비 환자에서 저주파전력이 나타난다고 하였으며, 이 저주파전력은 불완전 사지마비 환자에 비해 유의하게 낮았다고 보고하였다. 이와 같이 척수손상 환자의 심박변동 분석에 대한 보고는 그다지 많지 않으며, 저자마다 다양한 보고를 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 총 35명의 척수손상 환자를 대상으로 전동경사침대(tilt table)로 직립부하(orthostatic stress)를 시켜 손상부위 및 손상정도에 따른 자율신경 활동도의 변화를 심박변동 분석을 이용하여 비교 분석하고자 하였다.

## 연구대상 및 방법

### 1) 연구대상

1998년 3월부터 동년 12월까지 연세대학교 의과대학 재활의학과에 입원한 총 35명의 척수손상 환자를 대상으로 하였다. 이들은 고혈압, 심근경색, 울혈성 심부전 등의 심혈관계 및 뇌졸중 등의 뇌혈관계 질환 또는 당뇨병 등의 자율신경계 질환의 병력이 없었고, 자율신경 기능에 직접적으로 영향을 줄 수 있는 약물을 복용하고 있지 않으며, 심전도상 동조율(sinus rhythm)이고, 부정맥이나 허혈성 심질환 및 기타 이상소견을 나타내지 않았다. 완전 사지마비 환자 10명, 불완전 사지마비 환자 10명, 하지마비 환자 15명의 세 군으로 구성하였고, 대조군은 연령 및 성별의 분포가 유사한 총 30명의 건강한 정상성인을 대상으로 하였다. 척수손상 환자들은 남자 28명, 여자 7명이었고, 평균 연령은  $36.34 \pm 12.47$ 세였다. 한편 정상성인 대조군은 남자 24명, 여자 6명이었고, 평균 연령은  $34.33 \pm 8.53$ 세였다.

### 2) 연구방법

연구 대상자들은 실험 전날 음주를 금하였고, 실험 2시간 전에는 카페인 함유된 음료의 섭취 및 흡연을 금하였다. 또한 외적환경에 의하여 자율신경계가 영향을 받지 않도록 하기 위하여 실험실의 온도를  $24^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였고, 조용한 방에서 하루중 일정 시각인 오후 8~9시경에 실시하였다.<sup>12)</sup> 이들은 약 10분간의 안정을 취하면서 실험환경에 적응하도록 하고, 전동경사침대를 이용하여 양와위 자세 및 교감신경계를 최대한 항진시키기 위해 70도 경사자세에서 각각 5분간 심전도신호와 호흡신호를 측정하였다. 또한 호흡률을 일정하게 유지하기 위해, 코 밑에 부착한 센서를 통해 데이터 수집장치에서 발생되는 소리에 따라 호흡을 분당 15회(0.25 Hz)로 조절하였다.<sup>11,16,19)</sup> 연구 대상자들은 기립성 저혈압 등에 영향을 주지 않도록 복대 및 하지 스타킹 등을 착용하지 않고 심박변동 분석을 시행하였다.

신호처리는 심전도신호상 심전도상 QRS군을 비교적 크게 기록할 수 있는 Lead II의 심전도 신호로 일련의 R-R간격을 검출하여 동일한 시간간격으로 재배열하고, 자기회귀연산(autoregressive algorithm)을

시행하여 power spectrum을 얻었다. 이를 통해 측정된 저주파 전력(0.05~0.15 Hz)은 대부분 혈압조절과 관련된 교감신경 성분을 나타내며, 고주파 전력(0.2~0.3 Hz)은 모두 호흡률에 의존하는 부교감신경의 활동도를 나타낸다고 알려져 있다.<sup>8)</sup> 즉, 주파수영역 분석상 저주파전력 분석에서는 직립부하를 가하는 연구방법을 통하여 교감신경의 활동도를 극대화하여 측정하였고, 고주파전력 분석을 통해 부교감신경의 활동도를 측정하였다.<sup>1,2,20)</sup> 또한 이들 전력값의 단위는 0.5 Hz 이하의 spectrum 밀도인 총전력에서 각 주파수 성분을 나눈 정규화 값(normalized unit, nu)으로 표시하였다.<sup>14,15)</sup>

본 연구에서는 전동경사침대를 이용하여 앙와위 및 70도 경사자세에서 심박수, 저주파 전력, 고주파 전력, 총전력 등을 측정하여 자율신경계의 기능을 평가하고, 척추손상 부위 및 손상 정도에 따른 차이를 분석하였으며, 정상 대조군과 비교하여 척추손상 후 자율신경계 변화를 살펴보았다.

통계분석 방법은 완전 사지마비, 불완전 사지마비 및 하지마비 환자로 구성된 세 군의 척추손상 환자군과 정상성인 대조군의 총 네 군간의 차이를 비교하기 위하여 SPSS version 8.0을 이용한 Kruskal-Wallis test를 사용하였고, 각 군에서 앙와위 자세 및

70도 경사자세의 차이를 살펴보기 위해 Wilcoxon signed ranks test를 시행하였다.

## 결 과

### 1) 앙와위 자세(0도)

심박수는 완전 사지마비 환자에서 평균 72.21 beats/min, 불완전 사지마비 환자에서 평균 76.82 beats/min, 하지마비 환자에서 평균 80.30 beats/min, 정상성인에서 평균 77.36 beats/min으로 네 군간에 통계학적으로 유의한 차이가 없었다. 또한 저주파전력, 고주파전력 및 총전력에서도 모두 네 군간에 통계학적으로 유의한 차이가 없었다. 그러나 저주파전력은 완전 사지마비 환자에서 평균 0.26 nu, 불완전 사지마비 환자에서 평균 0.27 nu, 하지마비 환자에서 평균 0.36 nu, 정상성인에서 평균 0.35 nu으로 완전 사지마비 및 불완전 사지마비 환자에서 하지마비 및 정상성인에 비해 저주파 전력값이 낮은 경향을 보였다(Table 1, Fig. 1).

### 2) 70도 경사 자세

교감신경계를 최대로 자극시키는 70도 경사자세로 이동시, 심박수는 완전 사지마비 환자에서 앙와위

**Table 1.** Changes of Heart Rate Variability in Spinal Cord Injured Patients and Healthy Adults during Head-up Tilt Position

	Group 1 <sup>1)</sup> (n <sup>7)</sup> =10)	Group 2 <sup>2)</sup> (n=10)	Group 3 <sup>3)</sup> (n=15)	Control <sup>4)</sup> (n=30)
0 degree				
Heart rate (beats/min)	72.21±11.06	76.82±15.67	80.31±8.72	77.36±10.68
Normalized LF <sup>5)</sup> (nu <sup>8)</sup> )	0.26±0.13	0.27±0.12	0.36±0.13	0.35±0.09
Normalized HF <sup>6)</sup> (nu)	0.40±0.12	0.37±0.19	0.26±0.12	0.30±0.14
Normalized total (nu)	0.80±0.12	0.77±0.11	0.77±0.12	0.80±0.14
70 degree				
Heart rate (beats/min)	74.79±12.90	87.42±14.19*	89.53±11.82*	89.35±11.19*
Normalized LF (nu)	0.25±0.09	0.33±0.11	0.43±0.15*	0.51±0.16*
Normalized HF (nu)	0.25±0.14*	0.23±0.07*	0.17±0.10*	0.17±0.09*
Normalized total (nu)	0.66±0.14*	0.74±0.12	0.76±0.13	0.77±0.17

Values are mean±standard deviation.

1. Group 1: Complete tetraplegia, 2. Group 2: Incomplete tetraplegia, 3. Group 3: Paraplegia, 4. Control: Healthy adults, 5. LF power: Low frequency power (0.05~0.15 Hz), 6. HF power: High frequency power (0.2~0.3 Hz), 7. n: Numbers of subjects, 8. nu: Normalized unit

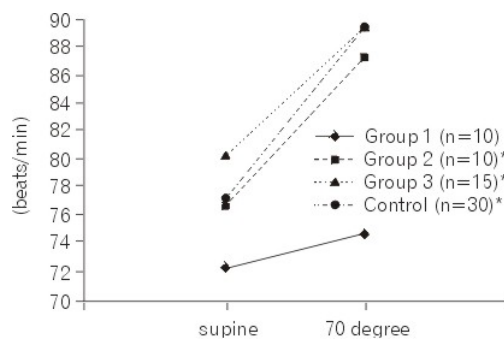
\*p<0.05 for comparison between 0 and 70 degree

자세의 평균 72.21 beats/min에서 70도 경사자세에서는 평균 74.79 beats/min으로 의미있는 차이가 나타나지 않은 반면 불완전 사지마비, 하지마비 및 정상 성인에서는 각각 평균 76.82 beats/min, 평균 80.30 beats/min 및 평균 77.36 beats/min에서 평균 87.42 beats/min, 평균 89.53 beats/min 및 평균 89.35 beats/min으로 통계학적으로 유의하게 증가하였다( $p < 0.05$ ) (Table 1, Fig. 1).

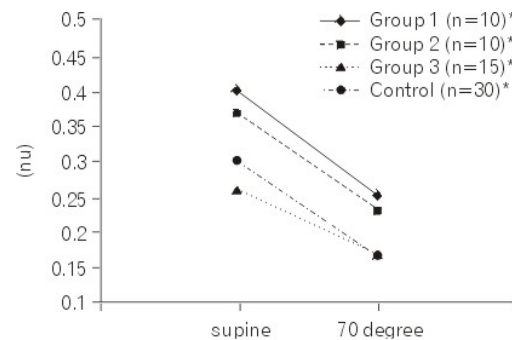
저주파전력의 경우는 하지마비 환자 및 정상성인에서 각각 평균 0.36 nu 및 평균 0.35 nu에서 평균

0.43 nu 및 평균 0.51 nu으로 통계학적으로 유의하게 증가하였고( $p < 0.05$ ), 불완전 사지마비 환자에서도 평균 0.27 nu에서 평균 0.33 nu으로 높아지는 경향을 보인 반면, 완전 사지마비 환자에서는 평균 0.25 nu으로 오히려 양와위 자세의 평균 0.26 nu보다 낮아져 각 군간에 뚜렷한 차이가 나타났다(Table 1, Fig. 2).

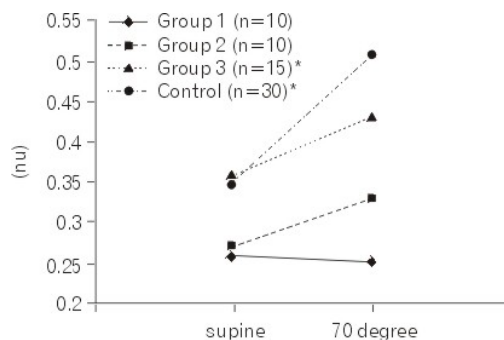
그러나 고주파전력은 양와위 자세에서 70도 경사 자세로 이동시, 네 군에서 모두 통계학적으로 유의하게 감소하여( $p < 0.05$ ), 각 군간에 의미있는 차이가 나타나지 않았다(Table 1, Fig. 3). 또한 총전력은 완



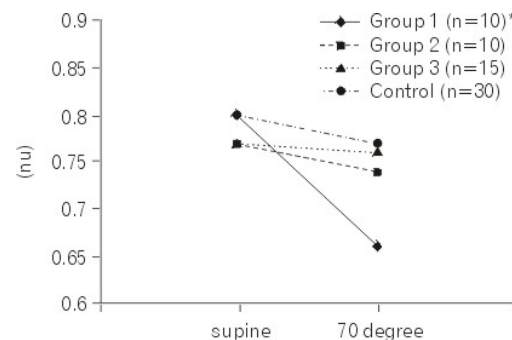
**Fig 1.** Changes of heart rate in spinal cord injured patients and healthy adults during head-up tilt position. Group 1: Complete tetraplegia, Group 2: Incomplete tetraplegia, Group 3: Paraplegia, Control: Healthy adults. \* $p < 0.05$



**Fig 3.** Changes of high frequency power in spinal cord injured patients and healthy adults during head-up tilt position. Group 1: Complete tetraplegia, Group 2: Incomplete tetraplegia, Group 3: Paraplegia, Control: Healthy adults. nu: Normalized unit \* $p < 0.05$



**Fig 2.** Changes of low frequency power in spinal cord injured patients and healthy adults during head-up tilt position. Group 1: Complete tetraplegia, Group 2: Incomplete tetraplegia, Group 3: Paraplegia, Control: Healthy adults. nu: Normalized unit. \* $p < 0.05$



**Fig 4.** Changes of total power in spinal cord injured patients and healthy adults during head-up tilt position. Group 1: Complete tetraplegia, Group 2: Incomplete tetraplegia, Group 3: Paraplegia, Control: Healthy adults. nu: Normalized unit. \* $p < 0.05$

전 사지마비 환자에서만 평균 0.80 nu에서 평균 0.66 nu으로 통계학적으로 유의하게 감소하였고( $p < 0.05$ ), 나머지 세 군에서는 모두 통계학적으로 의미있는 변화를 보이지 않았다(Table 1, Fig. 4).

## 고 찰

심장박동은 항상성 유지를 위하여 계속 변화하는데 심박변동(heart rate variability)은 심장주기(R-R interval)의 시간적 변동을 측정하고 정량화한 것이다.<sup>1,6)</sup> 심장박동은 동방결절의 자발적 흥분에 의해 시작하여 항상성 유지를 위해 교감 및 부교감신경의 상호작용으로 조절된다. 이러한 심장박동 주기의 시간적 변동을 정량화한 심박변동 분석을 통해 자율신경계의 교감 및 부교감신경의 활동도와 이의 균형상태를 측정할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>2,14)</sup> 심박변동의 power spectrum 분석을 통해 측정된 0.05~0.15 Hz 범위의 저주파 전력은 교감 및 부교감신경의 활동도를 동시에 반영하나, 직립부하를 가하는 방법을 통하여 최대한 교감신경계의 활동도를 반영하도록 하였다.<sup>3,20)</sup> 이외에 교감신경계를 자극하는 방법에는 직립부하 자극 이외에도 찬물 자극, 악관절의 등척성 운동 및 약제의 사용 등이 있으나,<sup>7,8)</sup> 본 연구에서는 기존의 정상 성인 및 뇌졸중 환자의 심박변동 분석시 사용하였던 방법인 전동경사침대를 이용하여 70도 경사자세의 직립부하를 가하는 연구 방법을 취하였다.<sup>1,2)</sup> 한편, 0.2~0.3 Hz 범위의 고주파 전력은 호흡률에 의존하며,<sup>11)</sup> 심장 박동에 대한 미주신경의 조절 작용과 관련이 있어 부교감신경계의 활동도에 대한 지표로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 연구 대상자의 호흡을 분당 15회(0.25 Hz)의 규칙적인 호흡수로 유지하여 저주파 성분의 활성 영역과 겹치는 것을 방지하여 고주파 전력값이 최대한 크게 나타나도록 하였다.<sup>1,17)</sup> 이와 같은 방법으로 측정된 저주파 및 고주파의 전력값은 교감 및 부교감신경 성분의 균형상태를 알아보기 위해 총전력에서 각 주파수 성분을 나누어 정규화 값(normalized unit, nu)으로 표시하였다.<sup>14,15)</sup>

전등의 보고<sup>1)</sup>에 의하면, 정상성인을 대상으로 연구에서 직립부하를 통해 교감신경의 활동도를 나타내는 저주파전력이 통계학적으로 유의하게 증가하였고, 부교감신경의 활동도를 나타내는 고주파전력은

유의하게 감소하였다고 보고하였다. 또한 Korpelainen등<sup>13)</sup>은 급성기 뇌졸중 환자에서 심박변동의 하루 주기의 변화(circadian rhythm)가 소실되며, 특히 부교감신경 성분의 감소는 부정맥 등의 심혈관계 합병증과 관련이 있다고 하였고, Kleiger등<sup>12)</sup>은 심근경색후 심박변동의 감소 및 부교감신경 성분의 소실은 치명적인 부정맥에 의한 급사와 관련이 있다고 보고하였다. 이와 같이 뇌혈관 및 심혈관계 환자에서 심박변동 분석을 통한 자율신경 기능 평가에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이를 통해 예후를 예측하려고 시도하고 있다.

본 연구결과, 앙와위 자세에서는 1990년 Inoue등<sup>7)</sup>이 경수손상에 의한 완전 사지마비 환자에서 상부의 심혈관계 중추와 말초 교감신경을 연결하는 척수내 교감신경 통로의 완전 절단에 의해 저주파전력 성분이 나타나지 않았다고 한 보고와는 달리, 완전 사지마비 환자에서도 저주파전력 성분이 나타났고, 이것은 1995년 Inoue등<sup>10)</sup> 및 Grimm등<sup>7,8)</sup>이 보고한 바와 일치하였다. 완전 사지마비 환자에서 저주파전력이 하지마비 환자 및 정상성인에 비해 현저히 낮은 경향을 보였고, 하부 흉수손상에 의한 하지마비 환자와 정상성인 대조군과는 거의 차이가 없는 것으로 보아, 경수 및 상부 흉수에 있는 교감신경 통로의 손상에 의해 저주파전력 성분이 낮아진 것으로 생각된다. 또한 완전 사지마비 환자에서도 저주파전력 성분이 나타난 것은 부신에서의 epinephrine 분비와 관련이 있거나,<sup>9,10)</sup> 자율신경 과반사증과 같이 손상부위 하부에서의 교감신경계 항진 때문이라고 생각된다.<sup>10)</sup> 한편, Inoue등<sup>10)</sup>은 하부 흉수손상에 의한 하지마비 환자에서도 손상부위 하부의 혈관에 분포하는 교감신경계의 기능부전과 보상성 부교감신경 억제에 의해서 저주파 및 고주파전력이 모두 정상 대조군에 비해 떨어진다고 보고하였으나, 본 연구에서는 하지마비 환자 및 정상성인에서 차이가 없는 것으로 보아, 손상부위 하부의 교감신경 기능부전은 그다지 심하지 않은 것으로 사료된다.

교감신경 활동도를 극대화시키기 위해 시행한 70도 경사자세에서는 하지마비 환자 및 정상성인에게서 저주파전력이 의미있게 증가하는 것과는 달리, 완전 사지마비 환자에서는 저주파전력이 오히려 감소하여 통계학적으로 유의하게 낮아졌다. 즉, 직립부하 자극에 의해 저주파전력은 각 군간의 차이가 더

속 뚜렷하게 나타났으며, 이것은 교감신경의 증가에 따른 보상성 부교감신경의 감소로 저주파전력 성분에 일부 나타나는 부교감신경이 소실되었기 때문으로 생각된다. 한편, 불완전 사지마비 환자에서는 저주파전력이 약간 증가하였는데, 이것은 일부 남아있는 척수내 교감신경 통로가 활성화되어 증가한 것이라고 생각된다. 또한 심박수는 70도 경사자세로 이동시 불완전 사지마비 환자, 하지마비 환자 및 정상성인에서 모두 통계학적으로 유의하게 증가하였으나, 완전 사지마비 환자에서는 의미있는 변화가 없었는데, 이들에게서 교감신경계의 손상으로 인해 직접부하 자극에 대한 보상성 빈맥 기전이 작용하지 않았기 때문이라고 생각된다.

그러나 70도 경사자세로 이동시 고주파전력은 네 군 모두에서 통계학적으로 유의하게 감소하여 각 군간에 의미있는 차이가 없는 것으로 보아, 척수손상 환자에서의 심박변동의 변화는 부교감신경 성분과는 직접적인 관계가 없고, 고주파전력의 감소는 교감신경계의 자극에 대한 부교감신경의 보상성 감소로 생각된다.<sup>8)</sup> 이는 Buntin 등<sup>5)</sup>이 시행한 척수손상 환자의 24시간 심박변동 분석에서 부교감신경을 나타내는 고주파전력은 정상성인과 차이가 없었으나 주로 교감신경을 나타내는 저주파전력은 정상성인에 비해 통계학적으로 유의하게 낮게 나타나 척수손상 환자는 교감신경계의 조절에 문제가 있을 것이라는 보고와 일치하였다. 또한 총전력은 불완전 사지마비 환자, 하지마비 환자 및 정상성인의 세 군에서는 의미있는 변화가 없었으나, 완전 사지마비 환자에서는 저주파전력의 감소에 따른 이차적인 총전력의 유의한 감소 소견을 보였다.

본 연구의 제한점으로는 각 군에 해당되는 연구대상자의 수가 적어 통계학적인 유의성이 부족하므로, 앞으로 더 많은 대상자를 통해 심박변동을 측정하여 이를 보완해야 할 것으로 사료되며, 척수손상 후 흔히 생길 수 있는 자율신경계의 불균형 상태인 기립성 저혈압 및 자율신경 과반사증 환자에서의 심박변동 분석을 통해 이들의 자율신경 활동도 변화를 측정해 보아야 할 것으로 보인다.

## 결 론

본원 재활의학과에서는 1998년 3월부터 12월까지

10명의 완전 사지마비, 10명의 불완전 사지마비 및 15명의 하지마비 환자로 구성된 총 35명의 척수손상 남자 환자와 30명의 정상성인 대조군을 대상으로 심박변동 분석을 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 처음 앙와위 자세에서는 심박수, 저주파전력, 고주파전력 및 총전력 등이 모두 척수손상 여부, 손상부위 및 손상정도에 관계없이 통계학적으로 유의한 차이가 없었다.

2) 교감신경의 활동도를 최대한 증가시키는 70도 경사자세에서 하지마비 환자 및 정상성인에서는 심박수 및 저주파전력이 통계학적으로 유의하게 증가된 반면( $p < 0.05$ ), 완전 사지마비 환자에서는 의미있는 변화를 보이지 않아 각 군간에 뚜렷한 차이가 나타났다.

본 연구 결과, 직접부하 상태에서 교감신경의 활동도를 나타내는 저주파전력이 완전 사지마비 환자에서는 의미있는 변화가 없는 것으로 보아, 이들에게서 자율신경계 특히 교감신경계의 조절에 문제가 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 1) 전중선, 전세일, 조경자, 진미령, 김태선, 김덕용, 안 준, 정기삼, 신근수, 이명호: 심박변동의 Power Spectrum 분석에 의한 정상 성인의 자율신경기능 평가. 대한재활의학회지 1997; 21: 928-935
- 2) 전중선, 전세일, 안 준, 박승현, 백소영, 강운주, 도원수, 정기삼, 신근수, 이명호: 뇌졸중 환자에서 심박변동의 Power Spectrum 분석에 의한 자율신경기능 평가. 대한재활의학회지 1998; 22: 778-783
- 3) Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Barger AC, Cohen RJ: Power spectral analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. Science 1981; 213: 220-222
- 4) Bootsma M, Swenne CA, Bolhuis HH, Chang PC, Cats VM, Bruschke AVG: Heart rate and heart rate variability as indexes of sympathovagal balance. Am J Physiol 1994; 266: H1565-H1571
- 5) Buntin DC, Warner AL, Brunnemann SR, Segal JL: Heart rate variability is altered following spinal cord injury. Clin Autonomic Res 1998; 8: 329-334
- 6) Cowan MJ: Measurement of heart rate variability. Western J Nursing Res 1995; 17: 32-48
- 7) Grimm DR, DeMeersman RE, Almenoff PL, Spungen AM, Bauman WA: Sympathovagal balance of the heart in subjects with spinal cord injury. Am J Physiol

- 1997; 272: H835-H842
  - 8) Grimm DR, DeMeersman RE, Garofano RP, Spungen AM, Bauman WA: Effect of provocative maneuvers on heart rate variability in subjects with quadriplegia. *Am J Physiol* 1995; 268: H2239-H2245
  - 9) Inoue K, Miyake S, Kumashiro M, Ogata H, Yoshimura O: Power spectral analysis of heart rate variability in traumatic quadriplegic humans. *Am J Physiol* 1990; 258: H1722-H1726
  - 10) Inoue K, Ogata H, Hayano J, Miyake S, Kamada T, Kuno M, Kumashiro M: Assessment of autonomic function in traumatic quadriplegic and paraplegic patients by spectral analysis of heart rate variability. *J Auton Nerv Syst* 1995; 54: 225-234
  - 11) Kamath MV, Fallen EL: Power spectral analysis of heart rate variability, a noninvasive signature of cardiac autonomic function. *Crit Rev Biomed Eng* 1993; 21: 245-311
  - 12) Kleiger RE, Miller JP, Bigger JT: Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1987; 59: 256-262
  - 13) Korpelainen JT, Sotaniemi KA, Huikuri HV, Myllylä VV: Circadian rhythm of heart rate variability is reversibly abolished in ischemic stroke. *Stroke* 1997; 28: 2150-2154
  - 14) Malliani A, Lombardi F, Pagani M: Power spectral analysis of heart rate variability, a tool to explore neural regulatory mechanisms. *Br Heart J* 1994; 71: 1-2
  - 15) Montano N, Ruscone TG, Porta A, Lombardi F, Pagani M, Malliani A: Power spectral analysis of heart rate variability to assess the changes in sympathovagal balance during graded orthostatic tilt. *Circulation* 1994; 90: 1826-1831
  - 16) Mukai S, Hayano J: Heart rate and blood pressure variabilities during graded head-up tilt. *J Appl Physiol* 1995; 78: 212-216
  - 17) Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R: Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variability as a marker of sympathovagal interaction in man and conscious dog. *Cir Res* 1986; 59: 178-193
  - 18) Parati G, Saul PS, Rienzo MD, Mancia G: Power spectral analysis of blood pressure and heart rate variability in evaluating cardiovascular regulation. *Hypertension* 1995; 25: 1276-1286
  - 19) Pomeranz B, Macaulay RJB, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gorton D, Kilborn KM: Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol* 1985; 248: H151-H153
  - 20) Vybiral T, Bryg RJ, Maddens ME, Boden WE: Effect of passive tilt on sympathetic and parasympathetic components of heart rate variability in normal subject. *Am J Cardiol* 1989; 63: 1117-1120
-